

Оценивая структуру чугуна по ГОСТ344-87 [7] форма и распределение графита в стандартном ЧВГ и в алюминии ЧВГ практически одинаковые, т.е. там и там форма графита соответствует эталону ВГф2, а его распределение эталону ВГр1, но по количеству включений на единицу площади они существенно отличаются. Поэтому количество включений графита в стандартном ЧВГ соответствует эталону ВГ70, а в алюминиевом ЧВГ этот показатель значительно превышает максимальный стандартный эталон ВГ100. Поэтому его использование становится недостаточным, т.к. количество графитных включений на единицу площади в алюминевом ЧВГ в 2 и более раза больше, чем в стандартном ЧВГ, и степень их компактности также более высокая (0,32 против 0,44 соответственно).

#### Заключение

При анализе пригодности поршневого материала для работы в условиях сложного термического нагружения нет необходимости проведения длительных испытаний на термическую выносливость или учитывать весь комплекс его механических и теплофизических свойств. Достаточно оценить термическую выносливость, с помощью критерия термической выносливости ( $K_{т.в.}$ ), основной составляющей которого, является работа деформации материала в упруго-пластической области при рабочей температуре детали. Обеспечение корректных результатов возможно при условии стабильности получения заданной структуры в поршнях. Выполнение этого условия возможно при постоянном контроле степени компактности графитных включений ( $Q_r$ ) в структуре отливок поршней, что требует поддержания режима литья поршней в заданных технологических параметрах. Последнее рассмотрено на примере алюминиевого ЧВГ.

#### Список литературы:

1. Балакин В.И. Форсированные дизели / Балакин В.И., Иванченко Н.Н., Круглова М.Г. - М.: Машиностроение, 1978. - 360 с.
2. Чекай Э. Экономнолегированные алюминево-кремниевые сплавы - как материал для поршней. Дис. ... канд. техн. наук. 05.02.01 / Чекай Э.- Х., 1985. - 210 с.
3. Отливки из чугуна с различной формой графита. ГОСТ 3443-87.
3. Таран С.Б. Оценка термической выносливости материалов поршней ДВС / С.Б. Таран, О.В. Акимов, А.П. Марченко // Двигатели внутреннего сгорания.-2010. -№ 1.- С 70-72.
4. Александров Н.Н. Применение высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом для деталей дизельных двигателей / Александров Н.Н., Б. С. Мильман, Л.В. Ильичева // Литейное производство. - 1979. - № 7. - с. 9-10.
5. Ворожейнов А. И. Разработка конструкции и исследование напряженного состояния поршней дизеля для энергонасыщенного трактора: -дис. канд. техн. наук. 05.05.03 / А. И. Ворожейнов. Харьков, 1983. - 205 с.
6. Тужиньски Ю. Чугун с вермикулярным графитом для тонкостенных деталей, работающих в условиях теплосмен: дис. канд. техн. наук. 05.02.01./ Ю. Тужиньски. Харьков, 1989. - 222с.
7. Отливки из чугуна с различной формой графита. ГОСТ 3443-87

#### Bibliography (transliterated):

1. Balakin V.I. Forsirovannye dizeli / Balakin V.I., Ivanchenko N.N., Kruglova M.G. - M.: Mashinostroenie, 1978. - 360 s.
2. Chekaj Je. Jekonomnolegированные aljuminievo- kremnievyje splavy - kak material dlja porshnej. Dis. ... kand. tehn. nauk. 05.02.01 /Chekaj Je.- H., 1985. - 210 s.
3. Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. GOST 3443-87.
3. Taran S.B. Ocenka termicheskoj vynoslivosti materialov porshnej DVS / S.B. Taran, O.V. Akimov, A.P. Marchenko // Dvigateli vnutrennego sgoraniya.-2010. - № 1.- S 70-72.
4. Aleksandrov N.N. Primenenie vysokoprochnogo chuguna s vermikuljarnym grafitom dlja detalej dizel'nyh dvigatelej / Aleksandrov N.N., B. S. Mil'man, L.V. Il'icheva // Litejnoe proizvodstvo. - 1979. - № 7. - s. 9-10.
5. Vorozhejnov A. I. Razrabotka konstrukcii i issledovanie naprjazhennogo sostojanija porshnej dizelja dlja energonasyennogo traktora: -dis. kand. tehn. nauk. 05.05.03 / A. I. Vorozhejnov. Har kov, 1983. - 205 s.
6. Tuzhin'ski Ju. Chugun s vermikuljarnym grafitom dlja tonkostennyh detalej, rabotajuwih v uslovijah teplosmen: dis. kand. tehn. nauk. 05.02.01./Ju. Tuzhin'ski. Har kov, 1989. - 222s.
7. Otlivki iz chuguna s razlichnoj formoj grafita. GOST 3443-87.

УДК 621.541

**Ф.І. Абрамчук, д-р техн. наук, О.І. Воронков, канд. техн. наук,  
А.І. Харченко, канд. техн. наук, С.С. Жилін, канд. техн. наук,  
І.М. Нікітченко, інж., В.С. Червяк, інж.**

### СТЕНД ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ І ДОСЛІДЖЕННЯ ПНЕВМОДВИГУНІВ

#### Вступ

Проблема використання стисненого повітря в якості робочого тіла в автомобільних силових установках набуває все більшої актуальності. Про це

свідчать інтенсивні науково-дослідні роботи, що проводяться у провідних країнах світу.

Удосконалюється двигун, що працює на стисненому повітрі, створений французьким фахівцем у

галузі ДВЗ Гі Негре. З'явилися свідчення про створення пневмоавтомобіля в Австралії винахідником Ді Пьетро. Відома британська фірма Lotus більше десяти років проводила роботу над універсальним двигуном, який може працювати в режимі двигуна внутрішнього згоряння і перетворюватися в компресор для рекуперації енергії гальмування. Заволзький моторний завод на базі двигуна ЗМЗ-4062-10 створює пневмодвигуни тощо.

Необхідно відмітити, що ці роботи розраховані на перспективу. Поки експериментальні зразки цих транспортних засобів мають незадовільні техніко-економічні показники якості і не можуть конкурувати із сучасними класичними транспортними засобами або з гібридами типу «ДВЗ–електромотор». Але за екологічними показниками вони задовольняють самим жорстким вимогам.

#### Аналіз публікацій

Для покращення показників пневмодвигунів силових агрегатів транспортних засобів різного призначення необхідно проводити не тільки теоретичні розробки, але й експериментальні випробування дослідних зразків. Ознайомлення з публікаціями, пов'язаними з випробуваннями пневмодвигунів, свідчать про практичну відсутність відомостей про будову експериментальних стендів і результатів випробувань. Дані про потужність та економічність пневмодвигунів і запас ходу транспортних засобів часто мають суто рекламний характер [1]. Відомості про випробування шахтних пневмодвигунів значною мірою застаріли, не відповідають сучасним вимогам та можливостям і не можуть бути використані для специфічних умов роботи пневмодвигуна у складі гібридної силової установки [2, 3]. Для всебічного дослідження пневмодвигунів за різних параметрів стисненого повітря з визначенням індикаторних і ефективних показників потрібні спеціальні науково-дослідні стенди з сучасними вимірювальними комплексами.

#### Мета та постановка задачі

Метою статті є розробка стенда і методики комплексного експериментального дослідження пневмодвигунів гібридних силових установок автомобілів і транспортних засобів спеціального призначення. Це дозволить отримувати дані, необхідні для вдосконалення техніко-економічних показників експериментальних зразків двигунів і розробки математичних моделей розрахунку процесів робо-

чого циклу двигунів, що працюють на стисненому повітрі.

#### Розробка стенда для експериментального дослідження пневмодвигуна

В лабораторії кафедри двигунів внутрішнього згоряння в 2009 р. створено стенд для експериментальних випробувань і досліджень пневмодвигунів як елемента гібридної силової установки автомобіля. Схема цього стенда зображена на рис. 1, а загальний вигляд – на рис. 2.

Стенд створювався з дотриманням вимог, що забезпечують виконання на належному науковому рівні таких робіт:

а) проведення випробувань пневмодвигунів на різних швидкісних і навантажувальних режимах в експлуатаційних діапазонах;

б) визначення ефективних параметрів роботи пневмодвигунів і зовнішніх умов їх випробувань:

- ефективної потужності,  $N_e$ , кВт;
- ефективного крутного моменту,  $M_e$ , Н·м;
- частоти обертання вихідного вала,  $n$ , хв<sup>-1</sup>;
- витрати енергоносія – стиснутого повітря,

$G$ , кг/год;

– тиску і температури стиснутого повітря на вході в двигун,  $p_{вх}$ , МПа і  $t_{вх}$ , °С;

– тиску і температури повітря на виході із двигуна,  $p_{вих}$ , МПа і  $t_{вих}$ , °С;

в) індицирування циліндра з метою визначення індикаторних параметрів робочого процесу пневмодвигуна;

г) реєстрація змінного тиску в повітряних каналах на вході і на виході повітря із двигуна.

Розглянемо технічну характеристику агрегатів стенда.

Об'єктом випробувань і досліджень є створений на кафедрі ДВЗ ХНАДУ чотирициліндровий V-подібний нереверсивний поршневий пневмодвигун (1, рис. 1) із золотниковим повітророзподільником і комбінованою системою змащення (підшипники ковзання колінчастого вала змащуються під тиском, а деталі циліндро-поршневої групи змащуються розбризкуванням). Діаметр циліндра  $D=76$  мм, хід поршня  $S=66$  мм. Розробка конструкції пневмодвигуна і його складання виконано на кафедрі ДВЗ у 2007 році.

Пневмодвигун створено шляхом конвертування бензинового двигуна внутрішнього згоряння повітряного охолодження МеМЗ-968.

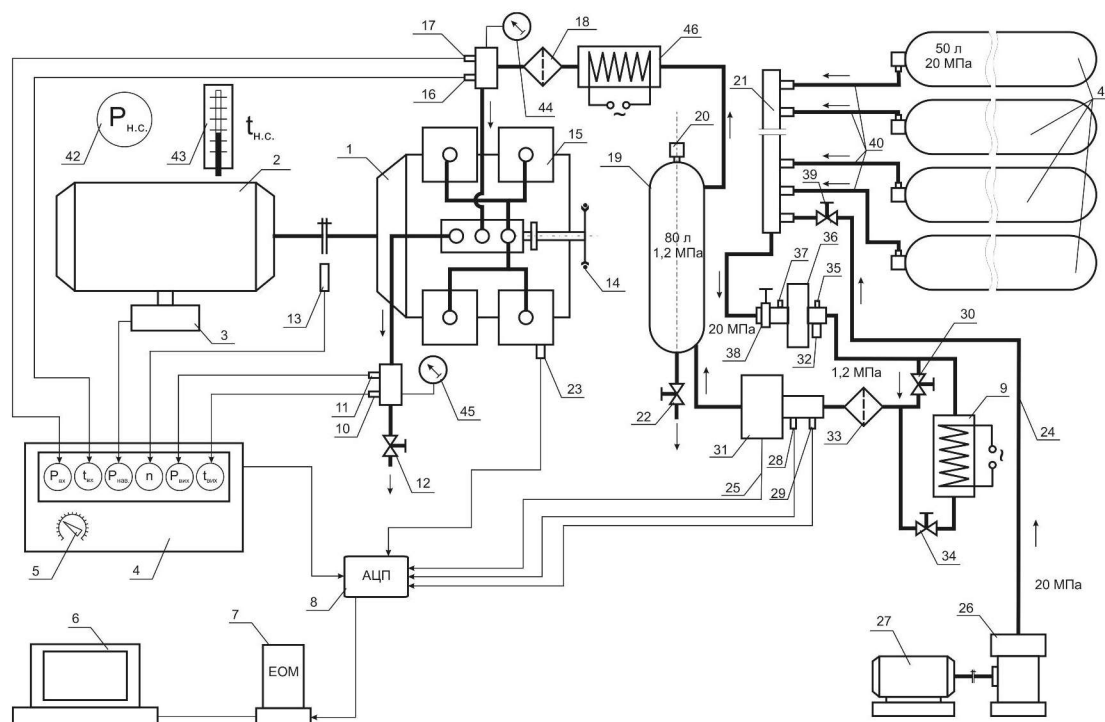


Рис. 1. Схема стенда для експериментального дослідження пневмодвигунів:

1 – пневмодвигун; 2 – електрична балансна машина; 3 – ваговий термінал; 4 – пульт керування; 5 – ручка керування корисного навантаження пневмодвигуна; 6 – дисплей; 7 – електронно-обчислювальна машина; 8 – аналогово-цифровий перетворювач (АЦП); 9 – електричний нагрівач стиснутого повітря; 10 – датчик температури; 11 – датчик тиску; 12 – регулювальний кран; 13 – індуктивний датчик частоти обертів; 14 – ланцюгова передача приводу золотника; 15 – кришка циліндра; 16 – датчик температури; 17 – датчик тиску; 18 – фільтр; 19 – повітряний ресивер низького тиску; 20 – запобіжний клапан; 21 – рампа повітряна високого тиску; 22 – дренажний вентиль; 23 – датчик індицирування циліндра; 24 – сталеві труби високого тиску; 25 – інформаційний канал витрат стиснутого повітря; 26 – чотириступеневий поршневій компресор; 27 – електродвигун привода компресора; 28 – датчик тиску; 29 – датчик температури; 30 – кран регулювання тиску і температури повітря перед пневмодвигуном; 31 – витратомір; 32 – запобіжний клапан; 33 – фільтр; 34 – кран регулювання тиску і температури повітря перед пневмодвигуном; 35 – пружинний манометр; 36 – газовий редуктор рамповий РКЗ-500-2; 37 – пружинний манометр; 38, 39 – запірні крани; 40 – сталеві труби високого тиску; 41 – балон для повітря високого тиску; 42 – барометр М67; 43 – ртутний термометр; 44, 45 – пружинні манометри; 46 – електричний нагрівач стиснутого повітря

Базові деталі: блок-картер, оребрені циліндри, деталі циліндро-поршневої групи, шатуни, вкладиші корінних і шатунних підшипників і ряд інших деталей взято від базового ДВЗ. V-подібна компоновка циліндрів забезпечила компактність і порівняно невеликі габарити пневмодвигуна. Використання алюмінієвого сплаву при виготовленні тунельного картера дала можливість одержати помірну масу всієї конструкції. Наявність чотирьох циліндрів дозволяє одержати достатньо рівномірний сумарний крутний момент і можливість пуску двигуна при будь-якому початковому положенні колінчастого вала. Наявність оребрення циліндрів інтенсифікує підведення теплоти із навколишнього середовища до робочого тіла, що розширюється, як відомо, з пониженням температури. Ця обставина

позитивно впливає на ККД робочого циклу і перешкоджає в деякій мірі обмерзанню випускних каналів.

Взамін серійного колінчастого вала з хрестоподібним розташуванням кривошипів було виготовлено новий колінчастий вал із двома кривошипами, розміщеними під кутом  $180^\circ$  («плоский вал»). При цьому до кожного кривошипа приєднуються два шатуни від лівого і правого циліндрів.

Золотниковий повітророзподіл має два канали: один – напірний та один – випускний, що сполучається з атмосферою і складається із нерухомої циліндричної золотникової коробки та розташованого всередині неї золотника, що обертається синхронно з колінчастим валом.



Рис. 2. Загальний вигляд стенда для дослідження пневмодвигунів

Золотникова коробка, розташована в розвалі блока циліндрів на якомога ближчій відстані від головок циліндрів, з якими вона з'єднується каналами (трубками). Фази повітророзподілу і переріз з'єднувальних каналів оптимізовані шляхом розрахункового дослідження, в якому критерієм оптимізації було обрано мінімальну питому витрату стис-

нутого повітря. Фази повітророзподілення: відкриття впускних вікон –  $3^\circ$  до ВМТ; закриття впускних вікон –  $55^\circ$  після ВМТ; відкриття випускних вікон –  $40^\circ$  до НМТ; закриття випускних вікон –  $80^\circ$  до ВМТ. Привід золотника здійснюється ланцюговою передачею від колінчастого вала (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Пневмодвигун у зборі з золотниковим повітророзподільником:

а – вигляд спереду; б – вигляд збоку

До установлення пневмодвигуна на лабораторний стенд він пройшов випробування на експериментальному автомобілі ЗАЗ-110550 з гібридною

силовою установкою за схемою «двигун внутрішнього згоряння – пневмодвигун».

Для задоволення необхідного зовнішнього навантаження (корисного крутного моменту) на pne-

вмодвигун на стенді використовується електрична балансира машина постійного струму МПБ 32,7/28 (2, рис. 1), що має таку технічну характеристику: потужність  $N_e = 25,1$  кВт; частота обертання  $n = 4000$  хв<sup>-1</sup>; сила струму  $I = 109$  А; напруга  $U = 230$  В; опір –  $R = 2,11$  Ом; регулювання електричного навантаження – зміненням незалежного збудження. На стендовому пульті керування 4 навантаження пневмодвигуна регулюється ручкою керування 5.

Ефективний крутний момент  $M_e$ , Н·м, що розвиває на валу пневмодвигун, визначається як добуток відомої величини плеча балансира машини  $l=0,5$  м, на величину сили навантаження  $P_n$ , кг,

$$M_e = l \cdot P_n \cdot 9,81, \text{ Н·м}, \quad (1)$$

де 9,81 – коефіцієнт перерахунку сили  $P_n$  в кг на силу в Н.

Ефективна потужність корисного пневмодвигуна  $N_e$ , як відомо, однозначно визначається величинами сили навантаження  $P_n$  і частотою обертання колінчастого вала  $n$

$$N_e = A \cdot P_n \cdot n, \text{ кВт}. \quad (2)$$

Для визначення сили навантаження  $P_n$  на стенді використовується ваговий термінал КОДА2 (поз. 3), що конкретно призначається для вимірювання аналогового сигналу тензодатчиків чутливого елементу з виводом результатів вимірювань на дисплей 6. Термінал забезпечує безпосереднє підключення до тензорезисторних мостових датчиків без додаткового сполучення. Опір навантаження терміналу не менший ніж 30 Ом. Термінал має індикатор, клавіатуру керування, інтерфейс для зв'язку з комп'ютером, а також різні типи протоколів передачі інформації. Калібровка терміналу виконується без зовнішніх регулювальних елементів зі збереженням кодів налаштування в запам'ятовуючому пристрої.

Стендова система живлення пневмодвигуна енергоносієм – стиснутим повітрям від балонів, як це видно зі схеми на рис. 1, складається із блока балонів високого тиску (до 20 МПа) 41, сталевих трубок високого тиску 40, рампи з трубопроводом 21, запірною крана 38, газового рампового кисневого редуктора РКЗ-500-2,36, де тиск повітря знижується до 1,2 МПа, крана 34 для тонкого регулювання тиску  $p_{ex}$  і температури  $t_{ex}$  повітряного фільтра 33, витратоміра G160 GMS DY-80, 31, повітряного ресиверу низького тиску 19, що служить для згладжування пульсацій тиску перед витратоміром,

електричного нагрівача 46, повітряного фільтра 18 і з'єднуючих трубопроводів.

Система подачі повітря від балонів є основною – вона забезпечує роботу пневмодвигуна на розрахунковому режимі: при тиску на вході  $p_{ex} = 1$  МПа і частоті обертання колінчастого вала  $n = 1364$  хв<sup>-1</sup> (за гранично допустимої середньої швидкості поршня  $C_{n \max} = 3,00$  м/с). При всіх позитивних якостях подачі стиснутого повітря від балонів така система має той важливий недолік, що робота пневмодвигуна в цьому випадку буде значно обмежена часом.

Для заправки балонів 41 стиснутим повітрям до 20 МПа на стенді використовується компресорна установка з чотиріступеневим поршневым компресором 26. З цієї установки повітря через кран 39 нагнітається безпосередньо в рампу 21, що з'єднана з балонами.

Для вимірювання частоти обертання колінчастого вала на стенді використовуються лічильник імпульсів СИ8 та індуктивний датчик імпульсів 13. Для індичування циліндра використовується датчик Honeywell MLH 300PSB 01A-46 23 з виводом інформаційних сигналів через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 8 і ЕОМ 7 на дисплей 6. Датчик для індичування установлений в кришці першого лівого циліндра пневмодвигуна. Для осцилографування тиску в повітряних каналах на вході 17 і на виході 11 із пневмодвигуна використовуються такого ж типу датчики, як і для індичування циліндра з виводом сигналів на дисплей і електронний індикатор на пульті керування. В ряді точок повітряного тракту виконуються вимірювання тиску за допомогою механічних пружинних манометрів: на вході 44 і на виході 45 із пневмодвигуна, на вході 37 і виході 35 із газового редуктора.

Температура стиснутого повітря на вході 16 і на виході 10 із пневмодвигуна вимірюється термомпарами ХК (хромель-копель) і результати виводяться на вимірювач-регулятор мікропроцесорний одноканальний ТРМ-1-н.у.р. ТУ 4211-016-46526536-2005 зі світлодіодним цифровим індикатором на пульті керування, а також на ЕОМ. Вимірювання тиску 28 і температури 29 стиснутого повітря перед витратоміром та інформаційний сигнал величини витрати повітря через витратомір виводяться через АЦП в ЕОМ і на дисплей.



### Результати випробувань пневмодвигуна із золотниковим повітророзподілом

Після налагодження і перевірки роботи окремих елементів стенда, було проведено випробування пневмодвигуна. На першому етапі випробувань було проведено індицирування надпоршневої порожнини поршневого пневмодвигуна з передачею

інформації на дисплей персонального комп'ютера (рис. 1). Було зафіксовано розгорнуту діаграму в координатах: тиск повітря в циліндрі двигуна  $p_v$ , МПа – ось ординат і кут повороту колінчастого вала в градусах  $\phi$  і час протікання процесу  $\tau$  в мс – ось абсцис. Приклад знятої розгорнутої діаграми  $p = f(\phi)$  наведено на рис. 4.

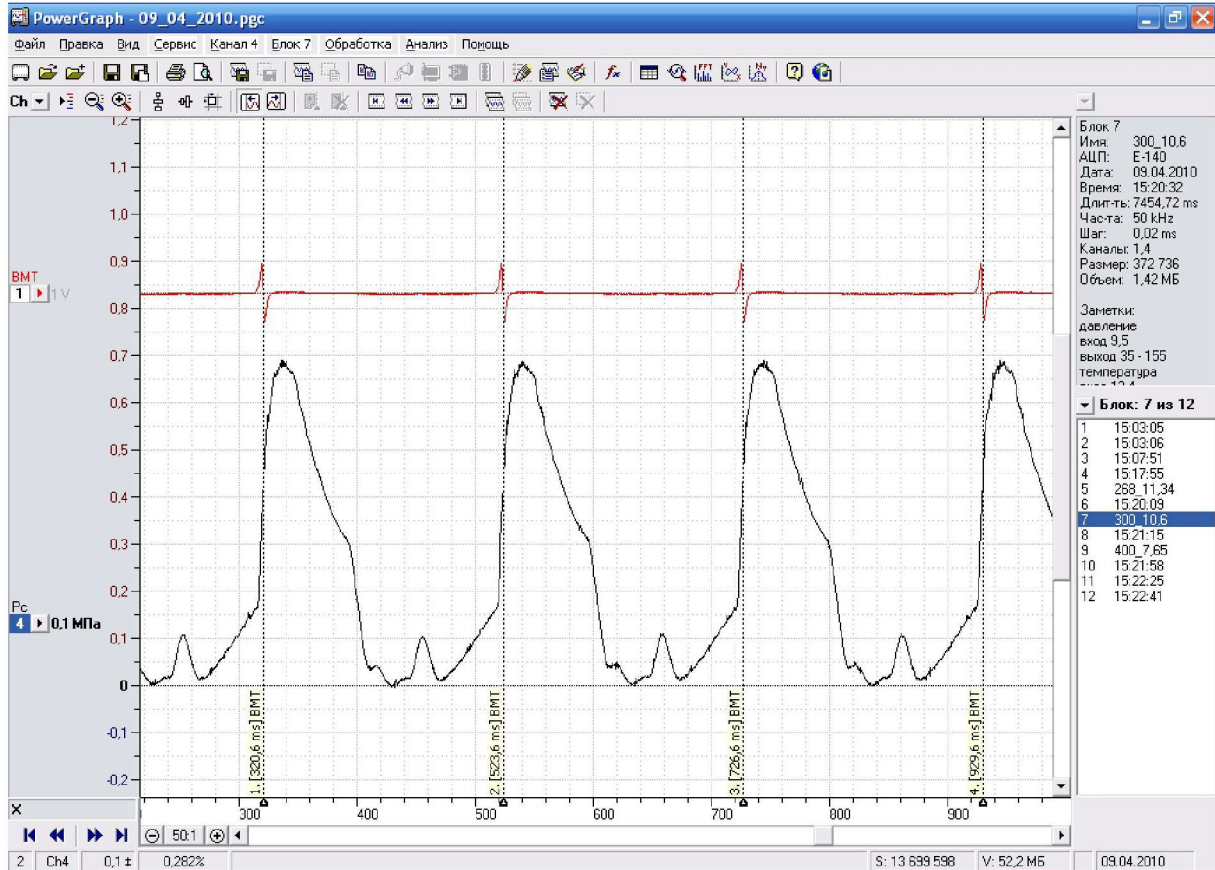


Рис. 4. Експериментальна індикаторна діаграма на режимах випробувань

Крім того, на діаграмі фіксувалися відмітка кута повороту і відмітка верхньої мертвої точки (ВМТ). Після цього за допомогою спеціальної програми розгорнута індикаторна діаграма перебудувалася у згорнуту діаграму в координатах « $p-V$ », де  $p$  – тиск у надпоршневій порожнині пневмодвигуна,  $V$  – об'єм надпоршневої порожнини. Приклад згорнутої індикаторної діаграми наведений на рис. 5. Як видно з діаграми, робочий цикл поршневого двигуна складається з чотирьох процесів:

- наповнення надпоршневій порожнини стисненням повітря;
- розширення повітря;
- вільний випуск (виштовхування) повітря;
- попередній стиск повітря.

Необхідно відзначити, що наприкінці приму-

сового випуску спостерігається хвилюподібне підвищення тиску, що викликається впливом випуску повітря із сусіднього циліндра, фази випуску яких мають перекриття.

За допомогою згорнутої індикаторної діаграми (рис. 5) було визначено середні значення показників політроп розширення

$$n_c = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{V_2}{V_1}}. \quad (3)$$

Для процесу стиску експериментально визначений середній показник політроп дорівнює  $n_c=1,67$ .

Ці значення політропи стиску збігається з даними середніх значень політроп стиску для порш-

невих компресорів, наведеними в роботі [4]  $n_c=1,4...2,0$ .

Для процесу розширення експериментально визначений середній показник політропи дорівнює  $n_p = 1,425$ , який перевищує значення показника адіабати для повітря за температури  $0^\circ \text{C}$   $\kappa = 1,4$ , що свідчать про відведення теплоти в процесі розши-

рення повітря в циліндрі пневмодвигуна.

На другому етапі було проведено серію випробувань пневмодвигуна за постійного тиску повітря після редуктора  $p_p=9,5$  бар і живлення стисненим повітрям від балонів 41 (рис. 1). Режим і результати випробувань наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Режими і результати випробувань пневмодвигуна

Оберти, $\text{хв}^{-1}$	Тиск, бар		Температура, $^\circ\text{C}$		Потужність, кВт	Витрата стисненого повітря, $\text{кг/год}$	Витрата стисненого повітря, $\text{кг}/(\text{кВт} \cdot \text{год})$
	на виході з редуктора	на вході у двигун	на вході у двигун	на виході з двигуна			
268	9,5	6,08	16,1	-16,4	1,56059	179,54	115,047
300	9,5	6,08	13,4	-22,4	1,61753	192,97	119,3009
400	9,5	5,44	11,4	-26,4	1,57131	208,47	132,6726
346	9,5	8,64	12,6	-28,9	2,68283	206,4	76,93522

Для кожного випробування визначався тиск повітря і температура на вході у двигун, температура на виході з двигуна, навантаження на електричному гальмі і витрата стисненого повітря пневмодвигуна. Крім того, на кожному режимі знімалася індикаторна діаграма.

Експериментальна індикаторна діаграма на режимах випробувань  $n = 300 \text{ хв}^{-1}$  наведена на рис. 4.

Попередній аналіз результатів випробування пневмодвигуна на стенді свідчить, що у двигуні має місце інтенсивне розширення стисненого повітря. Це підтверджується значними від'ємними значеннями температур повітря на виході з двигуна. Так, на режимі  $n=300 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=2,68 \text{ кВт}$  ця температура складає  $-28,9^\circ\text{C}$ . Цей факт необхідно враховувати при удосконаленні поршневого пневмодвигуна.

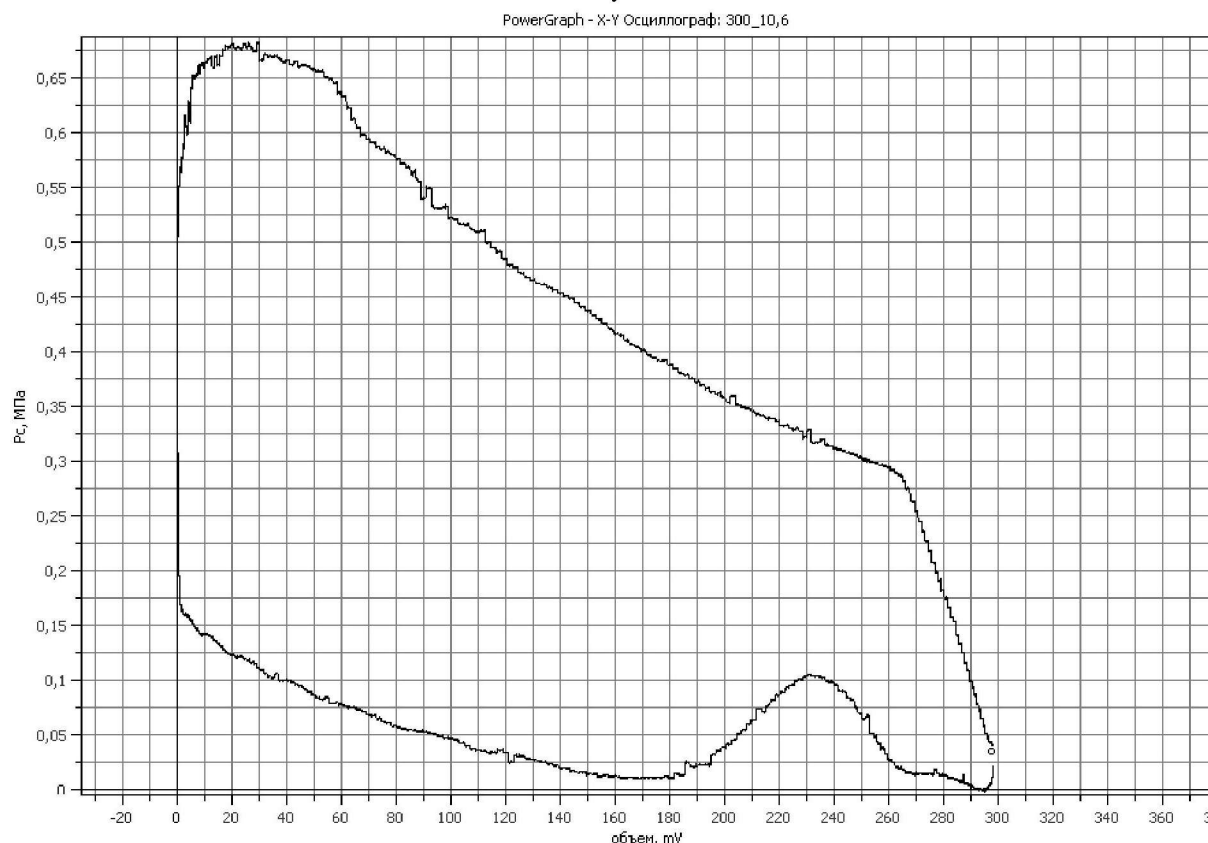


Рис. 5. Згорнута діаграма двигуна ( $n=300 \text{ хв}^{-1}$ ;  $N_e=1,617 \text{ кВт}$ )

З підвищенням потужності пневмодвигуна питома витрата стисненого повітря значно зменшується і приблизно дорівнює питомій витраті повітря кращих зразків шахтних пневмодвигунів [5].

Для режиму роботи пневмодвигуна:  $n=346 \text{ хв}^{-1}$ ,  $N_e=1,617 \text{ кВт}$  (табл. 1) було проведено обробку індикаторної діаграми на предмет визначення індикаторних показників. Визначений середній індикаторний тиск дорівнює  $p_i=0,38 \text{ МПа}$ .

Індикаторна робота циклу, кДж

$$L_i = p_i \cdot V_h = 380 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,114,$$

де  $V_h$  – робочий об'єм циліндра,  $V_h = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ .

Індикаторна потужність двигуна, кВт

$$N_i = \frac{p_i \cdot n \cdot z \cdot V_h}{30\tau} = \frac{0,38 \cdot 300 \cdot 4 \cdot 0,3}{30 \cdot 2} = 2,28,$$

де  $z$  – число циліндрів,  $z = 4$ ;  $\tau$  – тактність двигуна,  $\tau = 2$ .

Механічний ККД

$$\eta_M = \frac{N_e}{N_i} = \frac{1,617}{2,28} = 0,709.$$

Циклова витрата повітря, кг/цикл

$$g_e = \frac{G_T}{60 \cdot n \cdot z} = \frac{192,97}{60 \cdot 300 \cdot 4} = 2,68 \cdot 10^{-3},$$

де  $G_T$  – годинна витрата повітря.

Питома індикаторна робота, кДж/кг

$$l_i = \frac{L_i}{g_e} = \frac{0,114}{2,68 \cdot 10^{-3}} = 42,54.$$

Питома індикаторна робота, кДж/кг

$$l_{ao} = \frac{k}{k-1} R_n \cdot T_1 \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 287 \cdot 286,4 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{6,08}{1} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right] = 121,32$$

де  $R_n$  – газова стала повітря;  $T_1$  – температура повітря на вході у двигун;  $p_1, p_2$  – відповідно тиск повітря на вході в двигун і на виході з нього.

$$\eta_i = \frac{l_i}{l_{ao}} = \frac{42,54}{121,32} = 0,351$$

Ефективний ККД

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_M = 0,351 \cdot 0,709 = 0,249$$

## Висновки

1. На кафедрі ДВЗ ХНАДУ створено стенд для дослідження пневмодвигунів потужністю до 20 кВт, який дозволяє отримувати достовірні експериментальні дані індикаторних і ефективних показників циклу з метою подальшого вдосконалення двигунів, працюючих на стисненому повітрі, а також отримувати необхідні дані для розрахунку перспективних пневмодвигунів.

2. Стенд оснащений автоматизованою системою дослідження, яка дозволяє реєструвати та обробляти дані експериментального випробування.

3. Визначені ефективні та індикаторні показники дозволяють вибрати шляхи їх вдосконалення.

## Список літератури:

1. Австралийский и французский воздух успешно заменяют бензин [Электронный ресурс]. – 16 сентября 2004. – Режим доступа: <http://www.membrana.ru>.
2. Зиневич В.Д. Поршневые и шестеренные пневмодвигатели горно-шахтного оборудования / В.Д. Зиневич, Л.А. Гешлин. – М.: Недра. 1982. – 199 с.
3. Дегтярев В.И. Шахтные пневмомоторы / В.И. Дегтярев, В.И. Мьяковский, К.С. Борисенко. – М.: Недра, 1979. – 190 с.
4. Френкель М.И. Поршневые компрессоры / М.И. Френкель. – М.: Машиностроение, 1979. – 743 с.
5. Марутов В.А. Пневмопривод в отечественных и зарубежных горнорудных машинах / В.А. Марутов, Л.И. Пирогов, И.Г. Черников. – М.: НИИИНФОРМТЯЖМАШ. – 1970. – Вып. 2-70-30. – 26 с.

## Bibliography (transliterated):

1. Avstralijskij i francuzskij vozduh uspešno zamenja-jut benzin [Elektronnyj resurs]. – 16 sentjabrja 2004. – Rezhim dostupa: <http://www.membrana.ru>.
2. Zinevich V.D. Porshnevyje i shesterennye pnevmodvigateli gorno-shahtnogo oborudovanija / V.D. Zinevich, L.A. Geshlin. – M.: Nedra. 1982. – 199 s.
3. Degtjarev V.I. Shahtnye pnevmomotory / V.I. Degtjarev, V.I. Mjalkovskij, K.S. Borisenko. – M.: Nedra, 1979. – 190 s.
4. Frenkel' M.I. Porshnevyje kompressory / M.I. Frenkel'. – M.: Mashinoostroenie, 1979. – 743 s.
5. Marutov V.A. Pnevmpri-vod v otechestvennyh i zarubezhnyh gornorudnyh mashi-nah / V.A. Marutov, L.I. Pirogov, I.G. Chernilov. – M.: NIINFORMTJaZhMASH. – 1970. – Vyp. 2-70-30. – 26 s.